



Оригинальная статья

Условия формирования РЗЭ-содержащих минералов в неопротерозойских углеродсодержащих метаморфических породах хребта Енганэ-Пэ, Полярный Урал

О. В. Гракова[✉], К. С. Попвасев

Институт геологии им. Н.П. Юшкина Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар, Российская Федерация
[✉]ovgrakova@geo.komisc.ru

Аннотация

В статье приводятся данные о типохимических особенностях и условиях образования минералов редкоземельных элементов (РЗЭ) из метаморфических углеродсодержащих вулканогенно-осадочных и осадочных отложений манюкяхинской свиты (RF₃) хр. Енганэ-Пэ арктических территорий Урала. Среди минералов, содержащих РЗЭ во всех типах исследуемых пород, установлены алланит-(Ce), монацит-(Ce) и ксенотим-(Y). В метапелитах хр. Енганэ-Пэ впервые установлены фторкарбонат редких земель – синхизит-(Ce) и редкая разновидность гидратированного торита с повышенными содержаниями РЗЭ, Р, As ((Th_{0,44–0,55}Y_{0,21–0,24}Ca_{0,11–0,12}Zr_{0,08–0,09}Ce_{0,04}Fe_{0,03–0,04}Nd_{0,03}U_{0,05}Yb_{0,01–0,02}Gd_{0,01})_{Σ1,05–1,11}(Si_{0,70–0,72}P_{0,19–0,20}As_{0,06}V_{0,03})_{Σ1}O₄OH). В вулканогенно-осадочных породах хр. Енганэ-Пэ установлен редкоземельный водосодержащий силикат кайнозит-(Y) в ассоциации с карбонатами, на поверхности халькопирита обнаружен водный силикат меди, свинца и железа, определенный нами как кризейит. Изучение типоморфных и кристаллохимических особенностей позволило построить схему эволюции составов РЗЭ-содержащих минералов в исследуемых образованиях. В качестве основных минералов-концентраторов РЗЭ и Th в осадочных и вулканогенно-осадочных углеродсодержащих породах манюкяхинской свиты выступают циркон, апатит, алланит-(Ce), монацит-(Ce) и ксенотим-(Y). В результате гидротермально-метаморфических преобразований пород редкоземельные элементы переотлагались, образуя собственные минеральные формы: торит, синхизит-(Ce), кайнозит-(Y), гидротермально измененные зерна и каймы монацита-(Ce) и ксенотима-(Y).

Ключевые слова: Полярный Урал, неопротерозой, осадочные и вулканогенно-осадочные породы, РЗЭ-содержащие минералы

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН по теме НИР: «Глубинное строение, геодинамическая эволюция, взаимодействие геосфер, магматизм, метаморфизм и изотопная геохронология Тимано-Североуральского сегмента литосферы» (№ 12204060012-2) и «Развитие минерально-сырьевого комплекса Тимано-Североуральско-Баренцевоморского региона на основе эффективного прогноза, геологического моделирования, геолого-экономической оценки ресурсного потенциала и новых технологий переработки полезных ископаемых» (№ 12204060011-5).

Благодарности. Выражаем благодарность рецензенту за рекомендации и аналитикам А.С. Шуйскому, Е.В. Тропникову, В.А. Лобанову.

Для цитирования: Гракова О.В., Попвасев К.С. Условия формирования РЗЭ-содержащих минералов в неопротерозойских углеродсодержащих метаморфических породах хребта Енганэ-Пэ, Полярный Урал. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(2):186–204. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-2-186-204>

Conditions for the formation of REE-bearing minerals in Neoproterozoic carbonaceous metamorphic rocks of the Engane-Pe Ridge, Polar Urals

Oksana V. Grakova✉, Konstantin S. Popvasev

*Institute of Geology of Komi Science Centre of the Ural Branch, Russian Academy of Sciences,
Syktyvkar, Russian Federation
✉ovgrakova@geo.komisc.ru*

Abstract

This article presents data on rare earth element (REE) minerals, highlighting their typochemical characteristics and the specific geological conditions that promote their formation. The minerals investigated in this study originate from the metamorphic carbonaceous volcanogenic-sedimentary and sedimentary deposits found in the Manykuyakhinskaya suite (RF₃), located in the Engane-Pe Ridge within the Arctic regions of the Ural Mountains. The study identifies several REE-bearing minerals across all examined rock types, including allanite-(Ce), monazite-(Ce), and xenotime-(Y). Notably, within the metapelites of the Engane-Pe Range, the rare earth fluorocarbonate synchysite-(Ce) and a rare variety of hydrated thorite with increased contents of REE, phosphorus (P), and arsenic (As) have been documented for the first time. The chemical formula for this specific variety of thorite is represented as follows: $(\text{Th}_{0,44-0,55}\text{Y}_{0,21-0,24}\text{Ca}_{0,11-0,12}\text{Zr}_{0,08-0,09}\text{Ce}_{0,04}\text{Fe}_{0,03-0,04}\text{Nd}_{0,03}\text{U}_{0,05}\text{Yb}_{0,01-0,02}\text{Gd}_{0,01})_{\Sigma 1,05-1,11}(\text{Si}_{0,70-0,72}\text{P}_{0,19-0,20}\text{As}_{0,06}\text{V}_{0,03})_{\Sigma 1}\text{O}_4\text{OH}$. Moreover, a rare-earth water-containing silicate, known as krizeyite, has been discovered in association with carbonates in volcanic-sedimentary rocks from the Engane-Pe Ridge. In addition, an aqueous silicate containing copper, lead, and iron, referred to as krizeyite, has been observed on the surface of chalcopyrite. The investigation of typomorphic and crystallochemical characteristics has enabled the development of a schematic representation illustrating the evolutionary processes that influence the compositions of REE-bearing minerals within the studied formations. The primary minerals that concentrate REE and thorium (Th) in the sedimentary and volcanogenic-sedimentary carbonaceous rocks of the Manykuyakhinskaya suite include zircon, apatite, allanite-(Ce), monazite-(Ce), and xenotime-(Y). Hydrothermal-metamorphic transformations of the rocks resulted in the redeposition of REE, leading to the formation of distinct mineral forms such as thorite, synchysite-(Ce), and kainosite-(Y), along with hydrothermally modified grains and rims of monazite-(Ce) and xenotime-(Y).

Keywords: Polar Urals, Neoproterozoic, sedimentary and volcanogenic-sedimentary rocks, REE-bearing minerals

Funding. This study was conducted within the state assignment for the Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS, focusing on the following topics: “Deep structure, geodynamic evolution, interaction of geospheres, magmatism, metamorphism, and isotopic geochronology of the Timan-North Ural segment of the lithosphere” (No. 122040600012-2) and “Development of the mineral resource complex of the Timan-North Ural-Barents Sea region through effective forecasting, geological modeling, geological and economic assessment of resource potential, and the implementation of new mineral processing technologies” (No. 122040600011-5).

Acknowledgements. We extend our gratitude to the reviewer for their recommendations, as well as to analysts A. S. Shuisky, E. V. Tropnikov, and V. A. Lobanov for their contributions.

For citation: Grakova O.V., Popvasev K.S. Conditions for the formation of REE-bearing minerals in Neoproterozoic carbonaceous metamorphic rocks of the Engane-Pe Ridge, Polar Urals. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(2):186–204. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-2-186-204>

Введение

Редкоземельные элементы находят широкое применение в разных современных отраслях промышленности. В земной коре эти элементы встречаются в составе минералов, формирующихся в щелочных комплексах пород, карбонатитах,

гранитах повышенной щелочности и пегматитах. РЗЭ-содержащие минералы могут формироваться в процессе кристаллизации из насыщенных РЗЭ расплавов; могут являться продуктами постмагматического метасоматоза; возникать при поздней гидротермальной переработке или обра-

зовываться на поздней окислительной стадии в гипергенных условиях. Выявление механизмов преобразования минералов помогает восстановить физико-химические условия (температура, давление, состав флюидов) их образования.

В настоящее время в мире наблюдается дефицит редкоземельного сырья, что способствует активизации деятельности по их обнаружению и формированию новых источников. В частности, в Республике Саха (Якутия) проведен анализ минерально-сырьевой базы редких металлов, выделены наиболее перспективные проекты добычи редкоземельных и редких металлов, разработаны технологические схемы их первичного обогащения, глубокой переработки и сети промышленных производств по их извлечению, представлена модель создания единого редкометалльного кластера [1]. В докембрийских породах Башкирского антиклинория Южного Урала в последние годы обнаружено большое количество РЗЭ-содержащих минералов, уточнены условия их образования, а также взаимосвязь с процессами метаморфизма и магматизма [2, 3].

На севере Урала основные исследования были сосредоточены на изучении типоморфизма и химического состава РЗЭ-содержащих минералов в магматических породах [4–8; и др.]. В метаморфизованных древних толщах такие исследования практически не проводились. Вопросы о природе РЗЭ-минерализации: возрасте, термодинамических параметрах, условиях формирования РЗЭ-минералов в том числе приуроченных к метаморфизованным образованиям, зачастую остаются открытыми.

Первые сведения об условиях образования РЗЭ-минералов из докембрийских толщ Северного Урала были получены нами при изучении комплексов пород в северной части Ляпинского антиклинория (Приполярный Урал). Здесь ранее нами были описаны типохимические особенности редкоземельных карбонатов и титанониобатов, построена схема их формирования [9]. В слюдяных гранатсодержащих кристаллических сланцах няринского комплекса впервые были установлены анкилит-(Ce) и гидроксилбастнезит-(Ce), в актинолитсодержащих кварцальбит-эпидот-хлоритовых сланцах пуйвинской свиты – гидроксилбастнезит-(La), в метариолитах саблегорской свиты – бастнезит-(Ce), кайнозит-(Y) и эшинит-(Y). На Полярном Урале в неопротерозойских углеродсодержащих мета-

терригенных породах няровейской серии Харбейского комплекса нами были изучены ксенотим-(Y), монацит-(Ce) и коффинит [10]. В метабиитах севера Урала был установлен Ce–Cu–Ni-содержащий ферроспонит, изучены его типохимизм и возможные источники исходных компонентов [11].

В 2023 г. нами были проведены экспедиционные работы в южной (руч. Изъявож) и северной (руч. Манюкуяха) частях хр. Енганэ-Пэ. Здесь широко представлены разнообразные петротипы слабометаморфизованных пород: магматические (риолиты, базальты, андезиты, граниты) и осадочные (конгломераты, песчаники, аргиллиты, алевролиты), что представляет большой интерес для изучения видового разнообразия и типохимических особенностей редкоземельной минерализации. В поздневендских экстрезивно-субвулканических образованиях кислого состава лядгейского комплекса были описаны монацит и неидентифицированный РЗЭ-минерал, предположительно, эшинит-(Y) [12].

Целью работы является характеристика видового разнообразия, особенностей химического состава и условий образования РЗЭ-минерализации из углеродсодержащих метаморфизованных вулканогенно-осадочных и осадочных образований манюкуяхинской свиты (RF₃) хребта Енганэ-Пэ.

Материалы и методы

Химические составы и фотографии минералов были получены с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM–6400 с энергетическим спектрометром Link и Tescan Vega 3 LMN с энергодисперсионной приставкой Instruments X-Max (аналитик Тропников Е. М.). Дополнительно проведен химический анализ пород на содержание органического углерода (аналитик Лобанов Д.А.). Все анализы выполнены в ЦКП «Геонаука» Института геологии Коми НЦ УрО РАН. Формулы минералов рассчитывались по методике [13, 14].

Геологическое строение района исследований

Изучение и отбор проб проводилось в районе хр. Енганэ-Пэ, расположенного к северо-западу от Главного Уральского надвига. В районе исследований распространены верхнепротерозойские и палеозойские отложения (рис. 1). Верхнепротерозойские отложения принадлежат Центрально-Уральской мегазоне байкалид, Полярноуральской структурно-формационной зоне, Енганэпэйско-

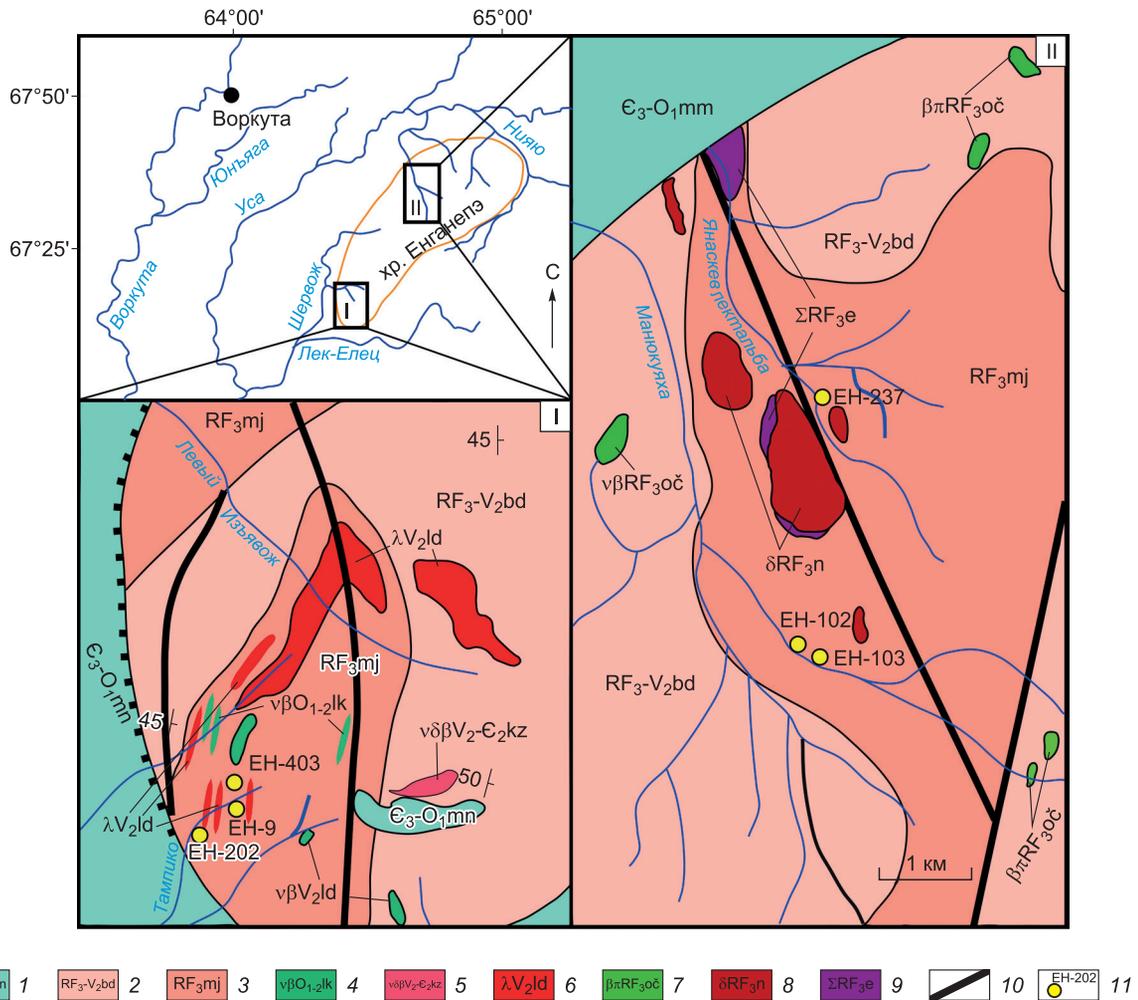


Рис. 1. Схема геологического строения южной (I) и северной (II) частей хр. Енганэ-Пэ [15]. 1 – манитаньрдская серия (E_3-O_1mn) – песчаники, гравелиты, конгломераты, алевриты, в нижней части базальты; 2 – бедамельская серия (RF_3-V_2bd) – туфоконгломераты, туфогравелиты, базальты, андезиты, дациты, риолиты, их кластолавы и туфы; 3 – манюкуяхинская свита (RF_3mj) – металавропесчаники, металавролиты, углеродисто-кремнисто-глинистые сланцы, фтаниты, углистые известняки; 4 – леквозжийский комплекс – оливиновые габбро и долериты; 5 – кзызгейский комплекс габбро-диоритовый плутонический – диориты, гранодиориты, плагиограниты; 6 – лядгейский комплекс вулканический – экструзивно-субвулканические образования кислого состава; 7 – нижнебедамельский (очетывисский) комплекс – экструзивно-субвулканические образования основного состава; 8 – нияюский комплекс плагиогранит-тоналитовый плутонический – диориты, тоналиты; 9 – енганэпейский комплекс гипербазитовый – гипербазиты, серпентиниты; 10 – разломы; 11 – места отбора и номера образцов

Fig. 1. Scheme of the geological structure of the southern (I) and northern (II) parts of the Engane-Pe Ridge [15]. 1. Manitanyrd series (E_3-O_1mn) – sandstones, gravelites, conglomerates, siltstones, basalts in the lower part; 2. Bedamel series (RF_3-V_2bd) – tuff conglomerates, tuff gravelites, basalts, andesites, dacites, rhyolites, their clastolaves and tuffs; 3. Manyukuyakhinskaya suite (RF_3mj) – meta-siltstones, meta-siltstones, carbonaceous-siliceous-clayey shales, phtanites, carbonaceous limestones; 4. Lekvozhsky complex – olivine gabbros and dolerites; 5. Kzyzgeysky gabbro-diorite plutonic complex – diorites, granodiorites, plagiogranites; 6. Lyadgeysky volcanic complex – extrusive-subvolcanic formations of acid composition; 7. Nizhnebedamelsky (Ochetyvisky) complex – extrusive-subvolcanic formations of basic composition; 8. Niyayusky plagiogranite-tonalite plutonic complex – diorites, tonalites; 9. Enganepeysky ultramafic complex – ultramafics, serpentinites. 10. Faults. 11. Sampling locations and sample numbers

Манитаньрдской подзоне. В их составе принимают участие осадочные и вулканогенно-осадочные образования верхнерифейского (манюкуяхинская свита) и верхнерифей-поздневендского (бедамельская серия) возраста.

Манюкуяхинская свита (RF_3mj) представлена металавропесчаниками, металавролитами, углеродисто-кремнисто-глинистыми сланцами и фтанитами, в верхней части с прослоями известняков. В нижней части изредка встречаются

ся прослойки афировых и порфировых базальтов и андезитобазальтов. Возраст манюкуяхинской свиты подтвержден U–Pb-методом датирования цирконов из гранодиоритов нияюского комплекса, прорывающих ее в ядре Манюкуяхинской антиклинали, абсолютный возраст которых установлен в пределах 719 ± 10 млн лет. Нижняя граница свиты не определена, верхняя проведена по подошве горизонта туфоконгломератов и туфогравелитов бедамельской серии, содержащих гальку пород манюкуяхинской свиты [15].

Бедамельская серия нерасчлененная (RF₃-V₂bd) в нижней части разреза включает базальты, андезитобазальты, андезиты, трахибазальты, их кластолавы, лавобрекчии, дациты и их туфы, туфоконгломераты и туфогравелиты. Верхняя часть разреза представлена лавами кислого состава, их кластолавами и туфами. Среди эффузивных и пирокластических пород кислого состава встречаются ксенотуфы и ксенокластолавы, содержащие обломки андезитового и андезибазальтового состава. Позднерифейский возраст низов разреза бедамельской серии обосновывается залеганием на манюкуяхинской свите, подтверждается содержанием микрофоссилий и нитчатых водорослей. Верхняя часть серии имеет поздневендский возраст; по единичным определениям U–Pb-методом датирования цирконов абсолютный возраст риолитов экструзивно-субвулканической фации фиксируется в пределах от 555 до 547 млн лет. Контакт с вышезалегающими отложениями энганэпейской свиты согласный. Верхняя граница бедамельской серии проводится по кровле пачки туфов и кластолав риолитов. Общая мощность бедамельской серии – более 2500 м.

Палеозойские отложения принадлежат к палеоконтинентальному сектору уралид (см. рис. 1). Манитанырдская серия (C₃–O₁mn) представлена мощной терригенной толщей, залегающей с угловым несогласием на рифейско-вендских отложениях или на кембрийской коре выветривания. В составе серии обычно выделяются две части: нижняя – преимущественно красноцветная и верхняя – зеленоцветно-сероцветная. Нижняя часть состоит из ритмично переслаивающихся кварцевых и олигомиктовых песчаников, кварцито-галечных гравелитов и конгломератов, окрашенных в лиловые и сиреневые тона. Красноцветная окраска, наличие косой слоистости, изменчивость по простиранию указывают на преимущественно субконтинентальные условия формирования отложений. Верхняя часть схожа по составу

с нижележащей терригенной толщей, окрашенной в серо-зеленоцветные тона, в алевролитовых прослоях среди песчаников часто содержатся органические остатки (брахиоподы, мшанки, криноидеи). Появление морской фауны и знаки ряби могут указывать на мелководно-морские условия осадкообразования верхней толщи. Мощность манитанырдской серии от 150 до 1500 м, в связи с такой изменчивостью мощностей и с учетом присутствия в разрезе серии рифтогенных высокотитанистых базальтоидов сделан вывод о ее возможной рифтогенной природе [15].

Образцы углеродсодержащих метапелитов и вулканогенно-осадочных пород маникуяхинской свиты были отобраны на руч. Тампико (южная часть хр. Енганэ-Пэ) и ручьях Манюкуяха и Янескеулектальба (северная часть хр. Енганэ-Пэ) (см. рис.1).

Метапелиты представлены метааргиллитами и метаалевролитами. Метааргиллиты (обр. ЕН-9, ЕН-237) характеризуются тонкозернистой основной тканью с прожилками, выполненными пелитизированным полевошпатовым агрегатом и микроагрегатом кварца. Тонкозернистая ткань представлена кварцем, серицитом, хлоритом. Текстура пород сланцеватая. В небольших количествах присутствует эпидот (рис. 2, а, б). В метаалевролитах (ЕН-103) отмечаются прослойки тонкозернистых песчаников, возможно, с примесью туфогенного кластического материала. Текстура сланцеватая, за счет ориентировки слюдястых минералов и длинных осей обломков. В основной ткани просматриваются фрагменты микрофельзитовой текстуры. Обломки (до 10 %) присутствуют как слабоокатанные (их большинство), так и хорошоокатанные. Они представлены преимущественно кварцем, полевыми шпатами, хлоритом. Основная ткань состоит из агрегата кварца, плагиоклаза, серицита и хлорита. Встречаются единичные чешуйки буровато-коричневого биотита (рис. 2, д, е).

Вулканогенно-осадочные породы (обр. ЕН-403, ЕН-202, ЕН-102) представлены туфопесчаниками. На микроуровне имеют обломочную, неравномерно-зернистую структуру, массивную, неявнополосчатую текстуру. Обломки средне-слабоокатанные, размерностью 0,05–0,25 мм, представлены преимущественно кварцем, плагиоклазом и калиевым полевым шпатом.

Содержание обломков около 25–40 %. Преимущественно присутствует основной плагио-

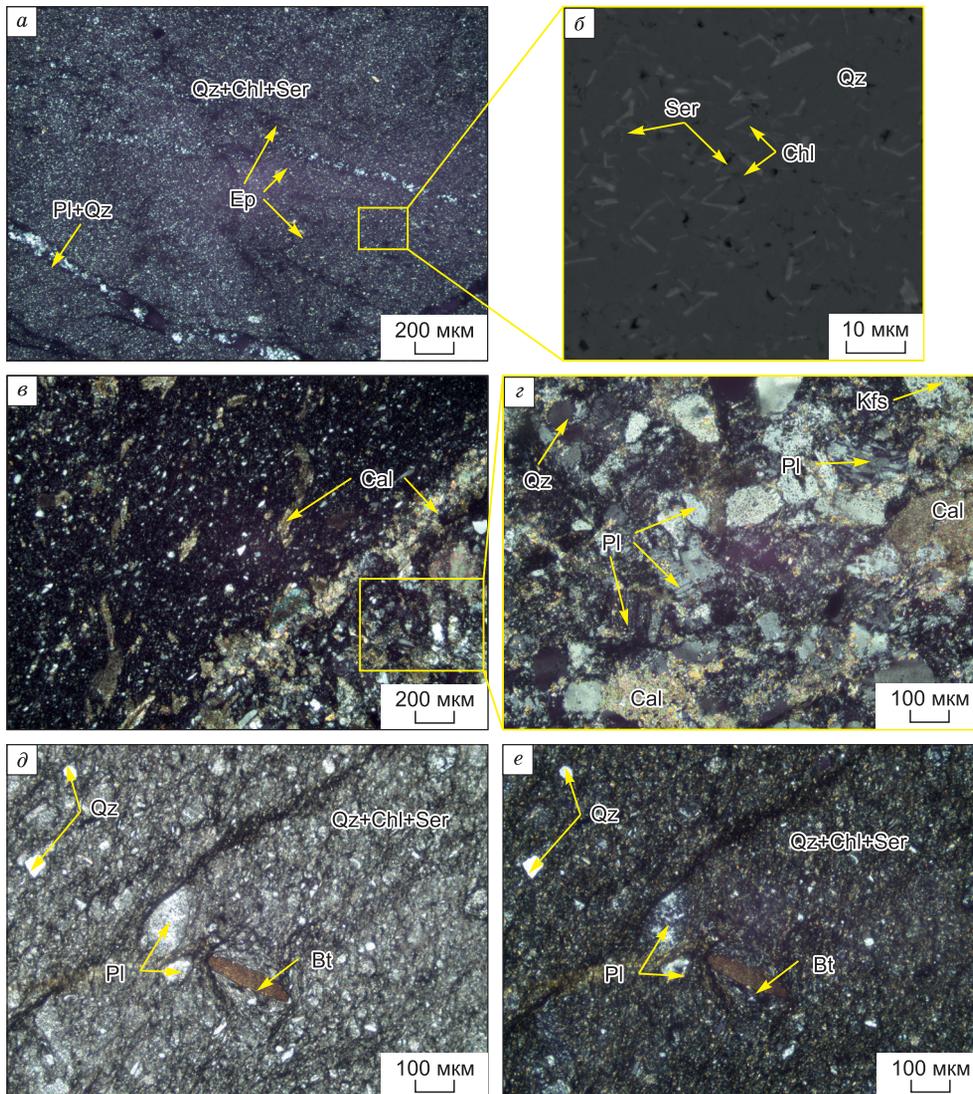


Рис. 2. Микрофотографии шлифов (*a, в-е*), и СЭМ-изображение (*б*) углеродсодержащих пород манюкуяхинской свиты. *a, б* – метааргиллит (ЕН-9); *в, з* – туфопесчаник (ЕН-202); *д, е* – метаалевролит (ЕН-103). Bt – биотит, Cal – кальцит, Chl – хлорит, Ep – эпидот, Kfs – калиевый полевой шпат, Pl – плагиоклаз, Ser – серицит, Qz – кварц

Fig. 2. Micrographs of thin sections (*a, в-е*) and SEM image (*б*) of carbon-bearing rocks of the Manyukuyakhinskaya suite. *a, б* – meta-argillite (EN-9); *в, з* – tuff-sandstone (EN-202); *д, е* – meta-siltstone (EN-103). Bt – biotite, Cal – calcite, Chl – chlorite, Ep – epidote, Kfs – potassium feldspar, Pl – plagioclase, Ser – sericite, Qz – quartz

клас, но отмечается и кислый. Калиевый полевой шпат серицитизирован, пелитизирован. Хлорит выделяется в нескольких генерациях: в виде отдельных чешуек в составе цемента, где совместно с серицитом замещает частично девитрифицированное вулканическое стекло, а также присутствуют обломки минералов, полностью замещенные хлоритом. В матриксе отмечается кальцит, развивающийся по основным плагиоклазам и тонкозернистому агрегату – хлорит-серицит-кварцевого состава и углеродистого вещества (см. рис. 2 *в, з*). Присутствие углерода

в терригенных породах манюкуяхинской свиты темно-серого до черного цвета установлено при петрографическом описании шлифов и подтверждено анализом на $C_{орг}$: в вулканогенно-осадочных породах его содержание составляет 0,19–1,98 %, в метапелитах – 0,38–0,53 %.

РЗЭ-содержащие минералы из метапелитов

В метааргиллитах южной части хр. Енганэ-Пэ (ЕН-9) ксенотим-(Y), ассоциирующий с кварцем, мусковитом, рутилом и ильменитом, присутствует в двух типах (рис. 3).

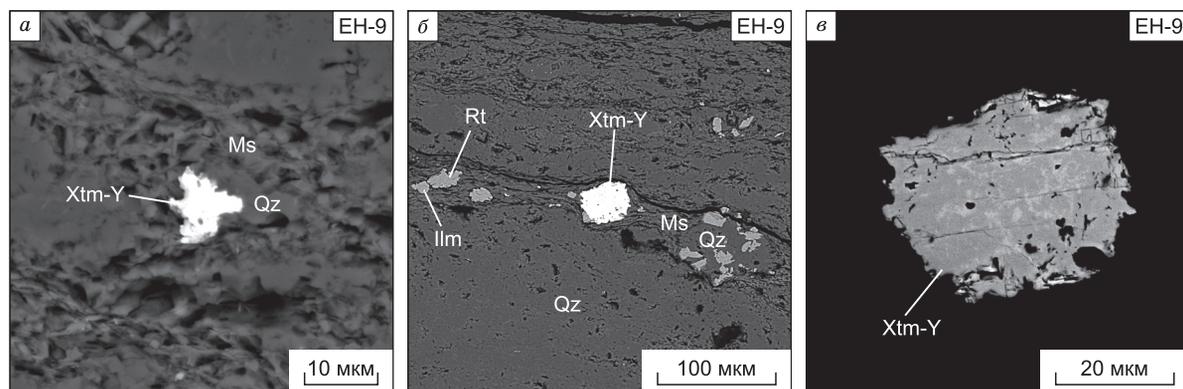


Рис. 3. Ксенотим-(Y) в метапелитах южной части хр. Енганэ-Пэ. а–в см. в тексте

Fig. 3. Xenotime-(Y) in metapelites of the southern part of the Engane-Pe Ridge. а–в see in text

Ксенотим-(Y) 1 типа представлен мелкими образованиями с неровными краями, размером 10–20 мкм (см. рис. 3, а). Химический состав приведен в табл. 1, ан. 3. Сумма оксидов РЗЭ в ксенотиме составляет 63,47 мас.%.
Ксенотим-(Y) 2 типа образует более крупные (40–50 мкм) изометричные кристаллы в мусковитовом матриксе (см. рис. 3, б). При большем увеличении наблюдается неоднородность в кристаллах – появляется крапленность светло-серого оттенка на фоне основной массы серого цвета (см. рис. 3, в). Ксенотимы-(Y) 2 типа отличаются по химическому составу от ксенотимов-(Y) 1 типа присутствием U и Th. Причем в более светлой части отмечается повышение содержания U и Th до 1,17 мас.% и до 2,06 мас.% (см. табл. 1, ан. 1), по сравнению с составом основной массы, где содержание U составляет 0,42 мас.%, Th – 0,80 мас.% (см. табл. 1, ан. 2). Сумма оксидов РЗЭ в ксенотиме-(Y) в светлой части – 61,78 %, основной массы – 64,57 мас.%.

Метаалевролиты северной части хр. Енганэ-Пэ (ЕН-103) содержат *монацит-(Ce)* и *ксенотим-(Y)* (рис. 4). РЗЭ-содержащие минералы здесь ассоциируют с хлоритом, мусковитом, альбитом, кварцем и рутилом.
Монацит-(Ce) представлен рассеянными по пространству породы кристаллами размерами 1–10 мкм и их скоплениями (см. рис. 4, а–г). Химические составы монацитов приведены в табл. 2. Сумма оксидов РЗЭ в монаците составляет 61,43–68,05 мас.%.

Ксенотим-(Y) присутствует в виде отдельных зерен размером около 10 мкм (см. рис. 4, д). Сумма редких земель – 60,66 мас.%. Встречается ксенотим-(Y), в котором наблюдаются более светлые участки (см. рис. 4, е). Мы считаем, что

эти участки еще не полностью замещившегося ксенотимом-(Y) монацита, так как известно, что минералы, обогащенные РЗЭ цериевой группы, выделяются раньше минералов, содержащих преимущественно РЗЭ иттриевой группы, которые накапливаются во время гидротермального процесса [16]. В химическом составе этих участков ксенотима в монаците почти в два раза уменьшается содержание оксида иттрия и появляются оксиды легких РЗЭ (см. табл. 1, ан. 6). Сумма оксидов РЗЭ в монаците составляет 61,43–68,05 мас.%.

Метааргиллиты северной части хр. Енганэ-Пэ (ЕН-237) содержат алланит-(Ce), REE-Y-P-As-содержащий торит и синхизит-(Ce). РЗЭ-минералы ассоциируют с альбитом, хлоритом, мусковитом, кварцем и апатитом (рис. 5).

Алланит-(Ce) образует крупные мелкозернистые скопления на площади более 10 мм² (см. рис. 5, а). Содержание оксидов РЗЭ достигает 23,62 – 26,47 мас.% (табл. 3, ан. 7, 8).

Обнаружен минерал, представленный удлиненными и изометричными зернами с однородным внутренним строением, диагностированный нами как гидротированный торит. Размеры зерен 15–20 мкм (см. рис. 5, б, табл. 3, ан. 5, 6). Минерал содержит повышенные значения РЗЭ (до 13,14–13,36 мас.%), фосфора (до 4,77 мас.%) и мышьяка (до 2,19 мас.%). Мы полагаем, что минерал представляет собой твердый раствор ряда торит–гаспарит–монацит, аналогичный установленному в 1962 церфосфорхаттониту, промежуточному элементу серии твердых растворов монацита-(Ce) и хаттонита с соотношениями Th:LREE и Si:P, близкими к 1:1 [17]. Содержание оксидов РЗЭ варьирует от 13,14 до 13,36 мас.%.

Таблица 1

Химические составы ксенотима-(Y) и кайнозита-(Y) (мас.%)

Table 1

Chemical compositions of xenotime-(Y) and cainosite-(Y) (wt.%)

Компонент	Метапелит						Вулканогенно-осадочная порода			
	ЕН-9			ЕН-103			ЕН-202			
	ксенотим-(Y)						кайнозит-(Y)			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO ₂	1,21	–	1,58	–	2,69	3,36	–	–	25,9	26,24
CaO	–	–	–	–	–	0,35	–	–	3,01	3,07
P ₂ O ₅	33,33	34,55	34,20	33,20	33,19	31,59	34,41	34,36	–	–
FeO	–	–	–	–	–	0,88	0,80	0,70	–	–
Fe ₂ O ₃	–	–	–	–	–	–	–	–	5,16	5,02
Al ₂ O ₃	–	–	–	–	–	0,49	–	–	–	–
Y ₂ O ₃	44,92	47,25	46,35	44,22	42,63	22,02	44,19	44,76	22,58	23,82
La ₂ O ₃	–	–	–	–	–	7,90	–	–	–	–
Ce ₂ O ₃	–	–	–	–	–	14,30	–	–	2,60	2,38
Pr ₂ O ₃	–	–	–	–	–	1,46	–	–	0,91	0,79
Nd ₂ O ₃	–	–	–	–	–	5,30	–	–	5,91	5,42
Sm ₂ O ₃	0,51	0,63	0,82	–	–	1,40	0,44	0,62	4,14	3,75
Eu ₂ O ₃	–	–	–	–	–	–	–	–	1,39	1,51
Gd ₂ O ₃	2,99	2,88	3,79	3,39	3,26	2,67	3,67	3,26	6,87	6,27
Tb ₂ O ₃	0,61	0,46	0,58	–	–	–	0,78	–	1,70	1,22
Dy ₂ O ₃	5,52	5,23	6,02	6,21	5,78	3,41	7,45	7,12	6,24	6,18
Ho ₂ O ₃	1,07	1,37	0,85	1,14	1,31	–	1,05	1,38	0,96	1,02
Er ₂ O ₃	3,46	3,66	3,13	3,63	3,67	1,51	3,83	4,10	1,41	1,48
Yb ₂ O ₃	2,70	3,09	1,93	2,07	2,63	1,09	2,11	2,95	–	–
ThO ₂	2,06	0,80	–	0,76	–	0,52	0,59	–	–	–
UO ₂	1,17	0,42	–	–	–	–	–	–	–	–
CO ₂ *	–	–	–	–	–	–	–	–	5,38	5,42
H ₂ O*	–	–	–	–	–	–	–	–	2,20	2,22
Σ _{REE}	61,78	64,57	63,47	60,66	59,28	61,06	63,52	64,19	54,71	53,84
Σ	99,55	100,34	99,25	94,62	95,16	98,25	99,32	99,25	96,36	95,81

1. (Y_{0,81}Dy_{0,06}Er_{0,04}Gd_{0,03}Yb_{0,02}Th_{0,02}Sm_{0,01}Tb_{0,01}Ho_{0,01}U_{0,01})_{Σ1,02}(P_{0,96}Si_{0,04})_{Σ1,00}O₄
2. (Y_{0,86}Dy_{0,06}Gd_{0,03}Er_{0,04}Yb_{0,03}Sm_{0,01}Tb_{0,01}Ho_{0,01}Th_{0,01})_{Σ1,06}P_{1,00}O₄
3. (Y_{0,81}Dy_{0,06}Gd_{0,04}Er_{0,03}Yb_{0,02}Sm_{0,01}Tb_{0,01}Ho_{0,01})_{Σ0,99}(P_{0,95}Si_{0,05})_{Σ1,00}O₄
4. (Y_{0,84}Dy_{0,07}Gd_{0,04}Er_{0,04}Yb_{0,02}Ho_{0,01}Th_{0,01})_{Σ1,03}P_{1,00}O₄
5. (Y_{0,74}Dy_{0,06}Gd_{0,04}Er_{0,04}Yb_{0,02}Ho_{0,01})_{Σ0,91}(P_{0,91}Si_{0,09})_{Σ1,00}O₄
6. (Y_{0,38}Ce_{0,17}La_{0,10}Nd_{0,06}Dy_{0,04}Gd_{0,03}Sm_{0,02}Pr_{0,02}Er_{0,02}Fe_{0,02}Yb_{0,01}Ca_{0,01})_{Σ0,87}(P_{0,87}Si_{0,11}Al_{0,02})_{Σ1,00}O₄
7. (Y_{0,81}Dy_{0,08}Gd_{0,04}Er_{0,04}Yb_{0,02}Fe_{0,02}Sm_{0,01}Tb_{0,01}Ho_{0,01})_{Σ1,05}P_{1,00}O₄
8. (Y_{0,82}Dy_{0,08}Gd_{0,04}Er_{0,04}Yb_{0,03}Ho_{0,02}Fe_{0,02}Sm_{0,01})_{Σ1,05}P_{1,00}O₄
9. (Y_{1,52}Ca_{0,44}Gd_{0,31}Nd_{0,29}Dy_{0,27}Sm_{0,19}Ce_{0,13}Tb_{0,08}Eu_{0,06}Er_{0,06}Pr_{0,05}Ho_{0,04})_{Σ3,56}(Si_{3,47}Fe_{0,53})_{Σ4}O₁₂(CO₃) · H₂O
10. (Y_{1,71}Ca_{0,46}Gd_{0,28}Dy_{0,27}Nd_{0,26}Sm_{0,17}Ce_{0,12}Eu_{0,07}Er_{0,06}Tb_{0,05}Pr_{0,04}Ho_{0,04})_{Σ3,54}(Si_{3,49}Fe_{0,51})_{Σ4}O₁₂(CO₃) · H₂O

Примечание: * – здесь и далее содержание H₂O и CO₂ – расчетные данные. Прочерк – ниже предела обнаружения.

Note: * – hereafter, the contents of H₂O and CO₂ are calculated values. The dash indicates that the value is below the detection limit.

Синхизит-(Ce) образует вытянутые тонко таблитчатые формы, расположенные в альбите (см. рис. 5, в) или кварце (см. рис. 5, г), которые, в свою очередь, приурочены к трещинам. В его

составе содержится значительное количество РЗЭ (47,93–50,49 мас.%) и CO₂ (26,80–27,13 мас.%) (см. табл. 3, ан. 1–4). Расчет вхождения в формулу SiO₂ и FeO не проводился, так как эти оксиды

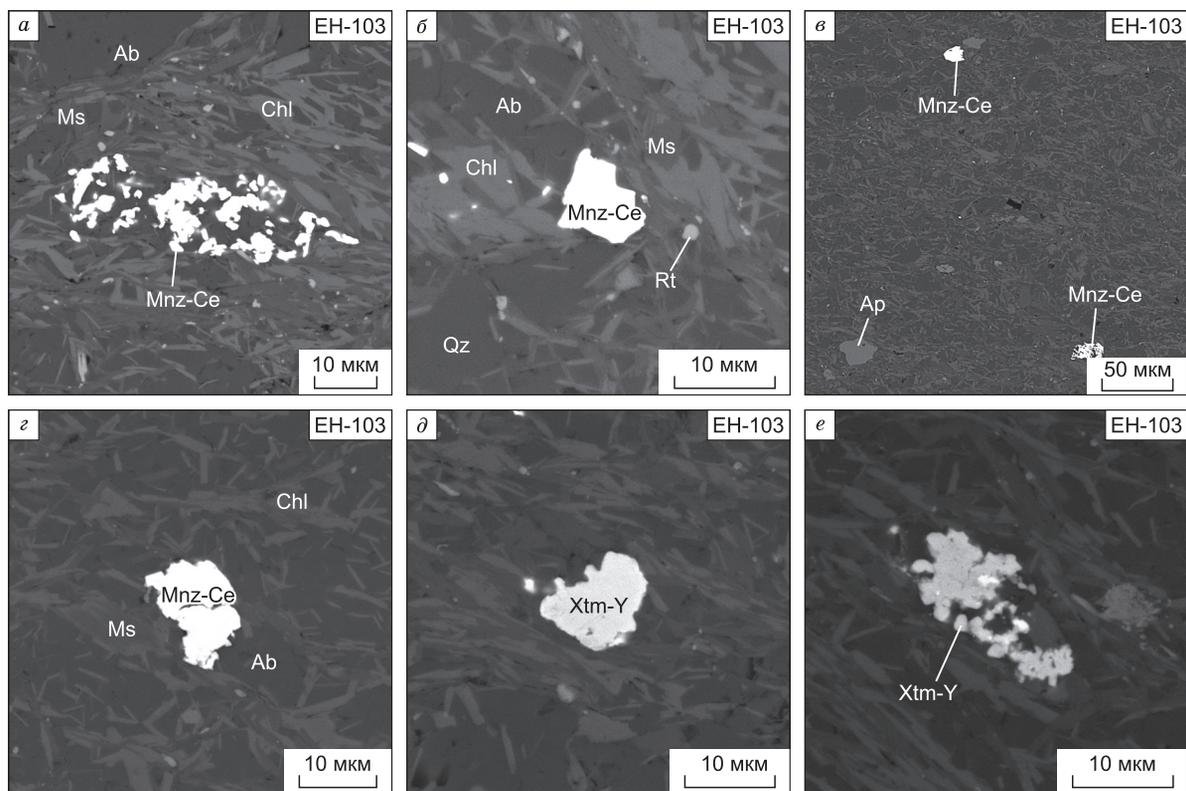


Рис. 4. Монацит-(Ce) и ксенотим-(Y) в углеродсодержащих металаевролитах северной части хребта Енганэ-Пэ. *a–e* см. в тексте

Fig. 4. Monazite-(Ce) and xenotime-(Y) in carbonaceous meta-siltstones of the northern part of the Engane-Pe Ridge. *a–e* see in text

не входят в эмпирические формулы, а нахождение минерала в кварце может обусловить влияние вмещающего матрикса. Расчетные значения $F < 1,0$, вероятно, из-за замещения части F на OH, так как минерал чаще всего имеет гидротермальное происхождение. Содержание оксидов РЗЭ составляет 47,93–50,49 мас. %.

РЗЭ-содержащие минералы в вулканогенно-осадочных породах

Южная часть хр. Енганэ-Пэ (ЕН-202, ЕН-403).

В этих породах РЗЭ-содержащие минералы представлены монацитом-(Ce), алланитом-(Ce), ксенотимом-(Y) и кайнозитом-(Y). Встречен минерал – гидросиликат меди, свинца и железа, содержащий неодим – кризейит (?). Эти минералы ассоциируют с хлоритом, кальцитом, альбитом и апатитом (рис. 6).

Монацит-(Ce) в пробе ЕН-202 присутствует в двух типах. Первый тип – это отдельные зерна (см. рис. 6, *a*), второй тип – гидротермально-измененные образования, развивающиеся по алланиту, выявленные в виде включений в кайно-

зите-(Y) (см. рис. 6, *a*, *b*), а также в сростках с халькопиритом (см. рис. 6, *b*). В образце ЕН-403 с противоположного борта руч. Тампико монацит-(Ce) образует мелкозернистые скопления, выполняющие трещины и пустоты в альбите (см. рис. 6, *в*). По химическому составу монацит цериевый (см. табл. 2, ан. 7–10). Содержание РЗЭ оксидов находится в пределах от 59,81 до 69,55 мас. %.

Алланит-(Ce) образует мелкозернистые скопления, размером около 2 мм, содержит включения монацита и халькопирита (см. рис. 6, *a*). Во внутренней структуре зерен отмечаются пустоты, связанные с гидратированностью минерала, расчетное содержание H_2O достигает 3,10 мас. % (см. табл. 3, ан. 9). Содержание оксидов РЗЭ достигает 23,96 мас. %.

Ксенотим-(Y) представлен почти полностью замещенными кайнозитом-(Y) зернами, реже присутствует в сростках с халькопиритом (см. рис. 6, *b*). Химический состав минерала приведен в табл. 1, ан. 7, 8. Содержание оксидов РЗЭ – 63,52–64,19 мас. %.

Химические составы монацита-(Ce) (мас.%)

Table 2

Chemical compositions of monazite-(Ce) (wt.%)

Компонент	Метапелит					Вулканогенно-осадочная порода								
	EH-103					EH-202				EH-403	EH-102			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
SiO ₂	3,80	0,54	–	–	–	–	–	–	–	0,89	1,29	1,29	1,22	0,50
CaO	0,36	0,35	1,49	–	0,37	–	0,47	0,18	0,62	0,49	0,22	–	1,27	–
P ₂ O ₅	28,98	28,82	29,54	29,06	29,64	29,59	28,86	32,02	28,96	26,90	29,77	30,62	28,29	29,03
FeO	0,54	0,72	0,49	0,52	0,68	0,55	0,79	0,89	0,44	6,49	0,48	–	–	0,45
Al ₂ O ₃	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,61	–	–	–	–
Y ₂ O ₃	–	–	2,24	–	–	–	–	10,32	–	–	–	–	–	–
La ₂ O ₃	14,50	28,63	13,24	17,59	13,61	13,15	17,06	11,12	13,23	12,80	14,41	14,17	13,56	22,91
Ce ₂ O ₃	30,08	31,31	28,12	32,69	30,92	30,64	32,40	26,14	28,65	27,14	31,34	31,31	29,54	34,88
Pr ₂ O ₃	3,46	1,76	3,03	3,11	3,92	4,17	4,04	3,08	3,27	2,99	3,83	3,76	3,29	3,29
Nd ₂ O ₃	13,64	5,77	10,74	12,42	14,75	15,89	11,80	13,11	13,22	12,93	14,78	14,51	11,38	8,80
Sm ₂ O ₃	2,64	0,58	2,26	1,47	2,73	3,78	2,48	2,86	2,13	2,66	2,73	2,62	1,39	–
Eu ₂ O ₃	–	–	–	–	–	–	–	–	0,63	–	–	–	–	–
Gd ₂ O ₃	1,63	–	1,80	–	1,46	1,92	1,05	1,77	1,78	1,29	1,06	1,58	0,78	–
ThO ₂	0,37	–	7,64	–	0,74	–	0,83	–	2,60	–	–	–	9,20	–
Σ _{REE}	65,95	68,05	61,43	67,28	67,39	69,55	68,83	68,40	62,91	59,81	68,15	67,95	59,94	69,88
Σ	99,99	98,48	100,59	96,86	98,82	99,69	99,78	101,49	95,53	95,19	99,91	99,86	99,92	99,86

1. (Ce_{0,39}La_{0,19}Nd_{0,17}Pr_{0,04}Sm_{0,03}Gd_{0,02}Fe_{0,02}Ca_{0,01})_{Σ0,88}(P_{0,87}Si_{0,13})_{Σ1,00}O₄
2. (Ce_{0,46}La_{0,42}Nd_{0,08}Pr_{0,03}Fe_{0,02}Ca_{0,02}Sm_{0,01})_{Σ1,04}(P_{0,98}Si_{0,02})_{Σ1,00}O₄
3. (Ce_{0,41}La_{0,20}Nd_{0,15}Th_{0,07}Ca_{0,06}Y_{0,05}Pr_{0,04}Sm_{0,03}Gd_{0,02}Fe_{0,02})_{Σ1,06}P_{1,00}O₄
4. (Ce_{0,49}La_{0,26}Nd_{0,18}Pr_{0,05}Sm_{0,02}Fe_{0,02})_{Σ1,02}P_{1,00}O₄
5. (Ce_{0,45}Nd_{0,21}La_{0,20}Pr_{0,06}Sm_{0,04}Gd_{0,02}Ca_{0,02}Fe_{0,02}Th_{0,01})_{Σ1,02}P_{1,00}O₄
6. (Ce_{0,45}Nd_{0,23}La_{0,19}Pr_{0,06}Sm_{0,05}Gd_{0,03}Sm_{0,02}Fe_{0,02})_{Σ1,03}P_{1,00}O₄
7. (Ce_{0,49}La_{0,26}Nd_{0,17}Pr_{0,06}Sm_{0,04}Fe_{0,03}Ca_{0,02}Gd_{0,01}Th_{0,01})_{Σ1,08}P_{1,00}O₄
8. (Ce_{0,35}Y_{0,20}Nd_{0,17}La_{0,15}Pr_{0,04}Sm_{0,04}Fe_{0,03}Gd_{0,02}Ca_{0,01})_{Σ1,01}P_{1,00}O₄
9. (Ce_{0,43}La_{0,20}Nd_{0,19}Pr_{0,05}Ca_{0,03}Sm_{0,03}Gd_{0,02}Th_{0,02}Eu_{0,01}Fe_{0,01})_{Σ1,00}P_{1,00}O₄
10. (Ce_{0,41}Fe_{0,22}La_{0,19}Nd_{0,19}Pr_{0,04}Sm_{0,04}Gd_{0,02}Ca_{0,02})_{Σ1,14}(P_{0,93}Si_{0,04}Al_{0,03})_{Σ1,00}O₄
11. (Ce_{0,43}La_{0,20}Nd_{0,20}Pr_{0,05}Sm_{0,04}Fe_{0,02}Gd_{0,01}Ca_{0,01})_{Σ0,96}(P_{0,95}Si_{0,05})_{Σ1,00}O₄
12. (Ce_{0,42}La_{0,19}Nd_{0,19}Pr_{0,05}Sm_{0,03}Gd_{0,02})_{Σ0,91}(P_{0,95}Si_{0,05})_{Σ1,00}O₄
13. (Ce_{0,43}La_{0,20}Nd_{0,16}Th_{0,08}Pr_{0,05}Ca_{0,05}Sm_{0,02}Gd_{0,01})_{Σ1,01}(P_{0,95}Si_{0,05})_{Σ1,00}O₄
14. (Ce_{0,51}La_{0,34}Nd_{0,13}Pr_{0,05}Fe_{0,01})_{Σ1,04}(P_{0,98}Si_{0,02})_{Σ1,00}O₄

Кайнозит-(Y) образует отдельные зерна с неровными краями размером около 50 мкм (см. рис. 6, а) и встречается в виде ксенотим-кайнозитового агрегата, где он почти полностью замещает *ксенотим-(Y)*, а также содержит включения галенита и монацита (см. рис. 6, б). Результаты химического анализа *кайнозита-(Y)* приведены в табл. 1, ан. 9, 10. Содержание оксидов РЗЭ составляет 53,84–54,71 мас.%.

На поверхности халькопирита отмечаются вторичные изменения (см. рис. 6, б). Вторичный минерал почти полностью окислился и содержит большое количество оксида железа, но по оставшимся элементам сделано предположение,

что первоначальный кристаллохимический состав минерала соответствовал *кризейиту (?)* – водному силикату меди, свинца и железа. Химический состав окисленного минерала, мас. %: SiO₂ – 8,08, CaO – 1,30, FeO – 48,42, CuO – 13,51, PbO – 5,14, Σ – 78,52. Этот же минерал развивается и на поверхности кайнозита-(Y) (см. рис. 6, а). Химические составы окисленного кризейита (?), мас. %: SiO₂ – 10,52, CaO – 1,77, FeO – 45,82, CuO – 9,94, PbO – 5,88, Y₂O₃ – 1,44, Nd₂O₃ – 0,62, Σ – 76,00. Идеальная кристаллохимическая формула кризейита – Cu₂Pb₂Fe₂Si₅O₁₇ · 6H₂O.

В северной части хр. Енганэ-Пэ (EH-102) породы содержат монацит-(Ce) и ксенотим-(Y)

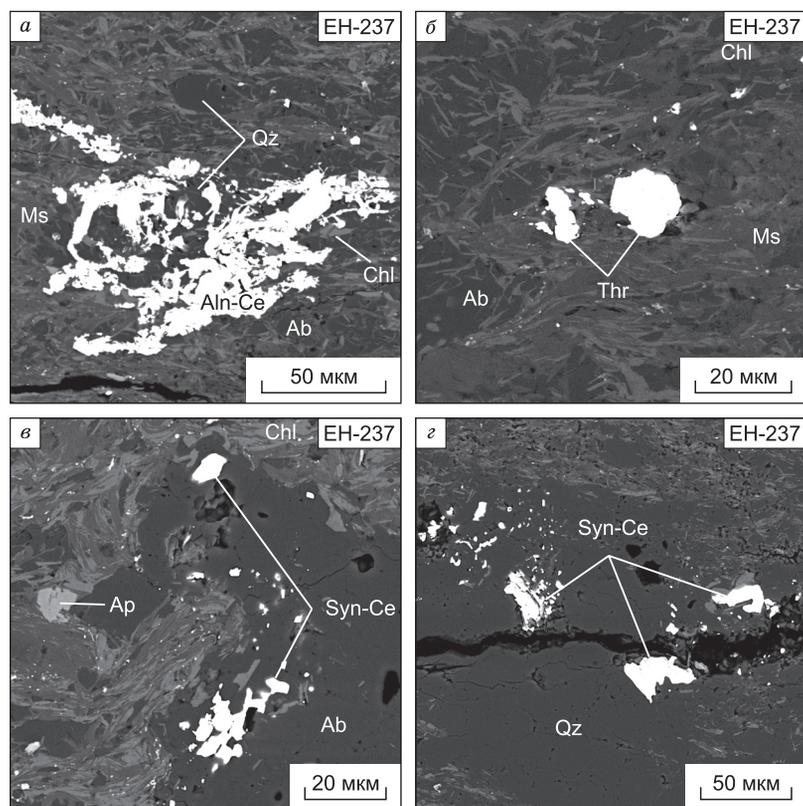


Рис. 5. Алланит-(Ce), торит и синхизит-(Ce) в метааргиллите северо-восточной части хребта Енгане-Пэ. *a–г* см. в тексте
Fig. 5. Allanite-(Ce), thorite and synchysite-(Ce) in meta-argillite of the northeastern part of the Enganepe Ridge. *a–г* see in text

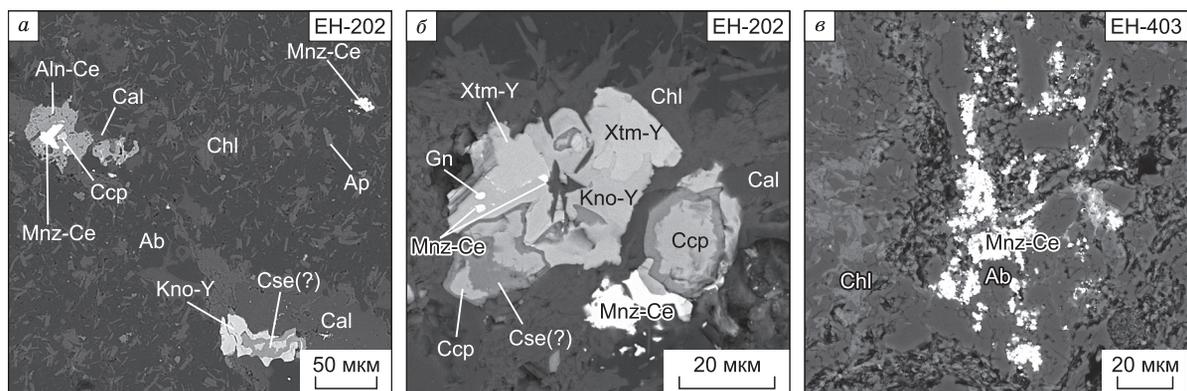


Рис. 6. Монацит-(Ce), алланит-(Ce), ксенотим-(Y) и кайнозит-(Y) в углеродсодержащих вулканогенно-осадочных породах южной части хр. Енгане-Пэ. *a–в* см. в тексте

Fig. 6. Monazite-(Ce), allanite-(Ce), xenotime-(Y) and kainosite-(Y) in carbonaceous volcanogenic-sedimentary rocks of the southern part of the Engane-Pe Range. *a–e* see in text

(рис. 7). РЗЭ-содержащие минералы ассоциируют с хлоритом, мусковитом, альбитом, кварцем и рутилом.

Монацит-(Ce) представлен двумя типами. Первый тип образует мелкие зерна размером 1–10 мкм, рассеянные по пространству породы

или группирующиеся в небольшие скопления (см. рис. 7, *a, б*). Второй тип представлен пористыми образованиями в виде гидротермально измененных кайм вокруг хорошо окатанных зерен более яркого цвета (см. рис. 7, *в*). В химическом составе ядерной части монацита (см. табл. 2, ан. 13)

Таблица 3

Химические составы алланита-(Ce), синхизита-(Ce) и REE-Y-P-As-содержащего торита (мас.%)

Table 3

Chemical compositions of allanite-(Ce), synchysite-(Ce) and REE-Y-P-As-bearing thorite (wt.%)

Компонент	Метапелит								Вулканогенно-осадочная порода
	EH-237								EH-202
	синхизит-(Ce)				торит		алланит-(Ce)		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SiO ₂	0,77	1,41	0,48	0,52	14,24	15,64	32,25	32,45	31,57
CaO	16,95	17,35	17,14	17,40	2,21	2,20	10,08	11,00	10,29
ZrO ₂	–	–	–	–	3,24	3,89	–	–	–
MnO	–	–	–	–	–	–	0,35	0,59	0,47
FeO	0,64	0,44	–	–	0,80	1,06	–	–	–
Fe ₂ O ₃	–	–	–	–	–	–	14,37	13,23	13,84
Al ₂ O ₃	–	–	–	–	–	0,82	17,98	19,63	17,51
P ₂ O ₅	–	–	–	–	4,77	4,71	–	–	–
V ₂ O ₅	–	–	–	–	1,04	0,98	–	–	–
As ₂ O ₃	–	–	–	–	2,07	2,19	–	–	–
Y ₂ O ₃	1,54	1,02	1,58	1,14	8,88	8,62	–	–	–
La ₂ O ₃	10,92	16,71	13,9	11,18	–	–	6,64	5,66	4,67
Ce ₂ O ₃	21,11	21,89	21,31	21,33	2,18	1,62	12,92	11,33	12,07
Pr ₂ O ₃	2,33	1,99	2,82	2,20	–	–	1,18	1,39	1,42
Nd ₂ O ₃	9,50	6,32	8,22	10,06	1,46	1,15	4,99	4,51	4,79
Sm ₂ O ₃	2,09	–	1,59	1,45	–	–	0,74	0,73	1,01
Gd ₂ O ₃	1,04	–	1,07	1,44	–	0,61	–	–	–
Yb ₂ O ₃	–	–	–	–	0,84	1,14	–	–	–
ThO ₂	–	–	–	–	48,64	44,35	–	–	–
UO ₂	–	–	–	–	0,95	4,60	–	–	–
F	4,90	4,31	4,21	4,68	–	–	–	–	–
CO ₂ *	26,82	26,87	27,13	26,80	–	–	–	–	–
H ₂ O*	–	–	–	–	5,99	5,99	3,19	3,30	3,10
Σ _{REE}	48,53	47,93	50,49	48,8	13,36	13,14	26,47	23,62	23,96
Σ	98,61	98,31	99,45	98,20	97,31	99,57	104,70	103,82	100,74

1. Ca_{0,99}(Ce_{0,42}La_{0,22}Nd_{0,19}Pr_{0,05}Y_{0,05}Sm_{0,04}Gd_{0,02})Σ_{0,98}(CO₃)₂F_{0,85}
2. Ca_{1,01}(Ce_{0,44}La_{0,34}Nd_{0,12}Pr_{0,04}Y_{0,03})Σ_{0,97}(CO₃)₂F_{0,74}
3. Ca_{0,99}(Ce_{0,42}La_{0,28}Nd_{0,16}Pr_{0,06}Y_{0,05}Sm_{0,03}Gd_{0,02})Σ_{1,01}(CO₃)₂F_{0,72}
4. Ca_{1,02}(Ce_{0,43}La_{0,23}Nd_{0,20}Pr_{0,04}Y_{0,03}Sm_{0,03}Gd_{0,03})Σ_{0,98}(CO₃)₂F_{0,81}
5. (Th_{0,55}Y_{0,24}Ca_{0,12}Zr_{0,08}Ce_{0,04}Fe_{0,03}Nd_{0,03}U_{0,05}Yb_{0,01})Σ_{1,11}(Si_{0,70}P_{0,20}As_{0,06}V_{0,03})Σ₁O₄OH
6. (Th_{0,44}Y_{0,21}Ca_{0,11}Zr_{0,09}Ce_{0,04}Fe_{0,04}Nd_{0,03}U_{0,05}Yb_{0,02}Gd_{0,01})Σ_{1,05}(Si_{0,72}P_{0,19}As_{0,06}V_{0,03})Σ₁O₄OH
7. (Ca_{1,01}Ce_{0,44}La_{0,23}Nd_{0,17}Pr_{0,04}Mn_{0,03}Sm_{0,02})Σ_{1,95}(Al_{1,52}Fe_{1,48})Σ_{3,00}(SiO₄)(Si₂O₇)O(OH)
8. (Ca_{1,07}Ce_{0,38}La_{0,19}Nd_{0,15}Pr_{0,05}Mn_{0,05}Sm_{0,02})Σ_{1,90}(Al_{1,52}Fe_{1,48})Σ_{3,00}(SiO₄)(Si₂O₇)O(OH)
9. (Ca_{1,07}Ce_{0,43}La_{0,17}Nd_{0,17}Pr_{0,05}Mn_{0,04}Sm_{0,03})Σ_{1,95}(Al_{1,52}Fe_{1,48})Σ_{3,00}(SiO₄)(Si₂O₇)O(OH)

отмечается повышенное содержание оксида Th (9,20 мас.%) и появление CaO (1,27 мас.%). Содержание оксидов РЗЭ составляет 59,94–69,88 мас.%.
Обсуждение результатов

В углеродсодержащих породах хребта Енганэ-Пэ установлена следующая РЗЭ-содержащая ми-

нерализация: алланит-(Ce), монацит-(Ce), ксенотим-(Y), синхизит-(Ce), торит и кайнозит-(Y). Распределение суммы оксидов РЗЭ в этих минералах приведено на рис. 8. В монаците-(Ce) и ксенотиме-(Y) максимальная сумма оксидов РЗЭ достигает 69,55 и 64,57 мас.% соответственно. В кайнозите-(Y) и синхизите-(Ce) ее зна-

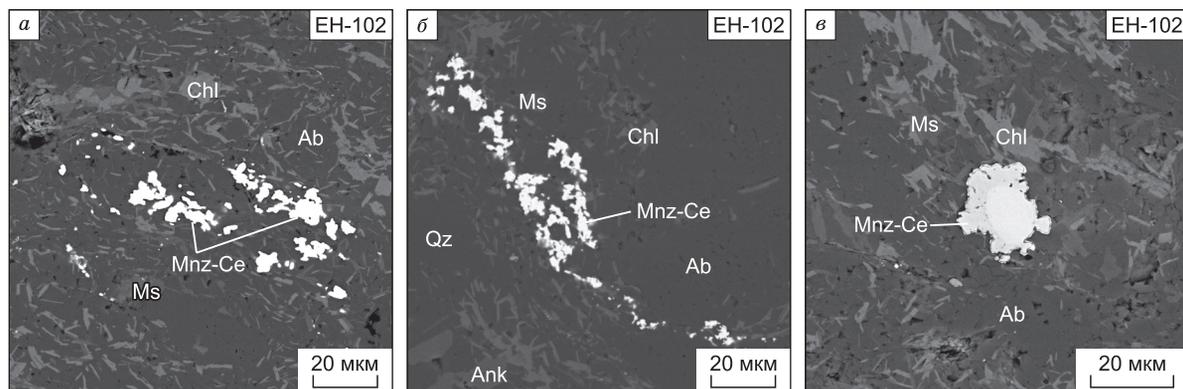


Рис. 7. Монацит-(Ce) в углеродсодержащих вулканогенно-осадочных породах северо-восточной части хр. Енганэ-Пэ. а–в см. в тексте

Fig. 7. Monazite-(Ce) in carbonaceous volcanogenic-sedimentary rocks of the north-eastern part of the Engane-Pe Ridge. а–в see in text

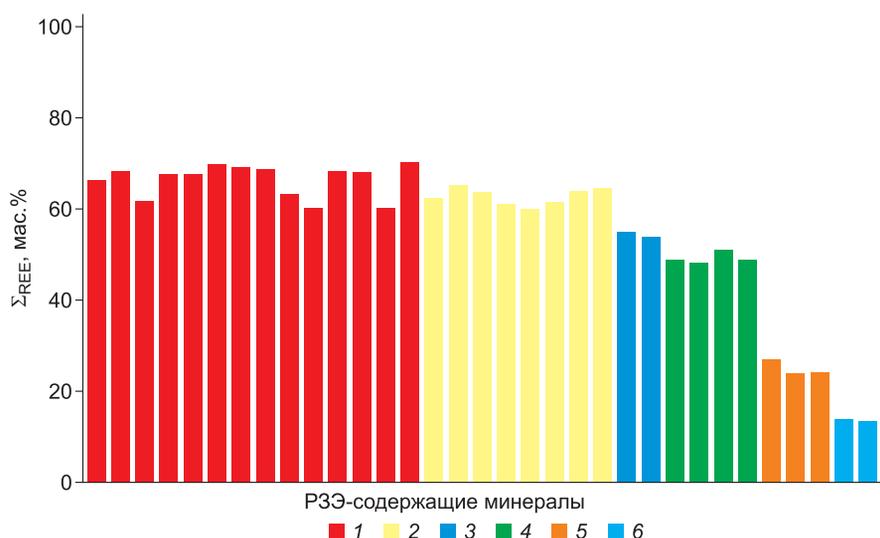


Рис. 8. Распределение суммы оксидов редких земель в РЗЭ-содержащих минералах: 1 – монацит-(Ce), 2 – ксенотим-(Y), 3 – кайнозит-(Y), 4 – синхизит-(Ce), 5 – алланит-(Ce), 6 – торит

Fig. 8. Distribution of the sum of rare earth oxides in REE-bearing minerals: 1 – monazite-(Ce), 2 – xenotime-(Y), 3 – kainosite-(Y), 4 – synchysite-(Ce), 5 – allanite-(Ce), 6 – thorite

чения немного меньше – до 54,71 мас.% в первом минерале и до 50,49 мас.% – во втором. Меньше всего РЗЭ содержится в алланите-(Ce) – до 26,47 мас.% и торите – до 13,36 мас.%.

Алланит-(Ce) типичный акцессорный минерал магматитов и метаморфитов в породах манюкяхинской свиты. Он представлен цериевой разновидностью (см. табл. 3, ан. 7–9).

Составы монацита-(Ce) были нанесены на Ce–La–Nd-диаграмму. Химические составы монацитов осадочных и вулканогенно-осадочных пород по содержанию La разделились на два поля (рис. 9). Монациты, отнесенные нами к ги-

дротермальному типу (на рисунке обозначены треугольником), практически не имеют различий в составе с монацитами из осадочных или вулканогенно-осадочных пород. Они характеризуются немного пониженным содержанием Nd. Монациты, образованные в гидротермальную стадию образования, отличаются повышенным содержанием Th (см. табл. 2, ан. 3,13).

Ксенотим-(Y) установлен в двух разновидностях, различающихся по химическому составу. Первая разновидность характеризуется повышенными содержаниями U и Th. На бинарной диаграмме ксенотим, изученный в осадочных и вул-

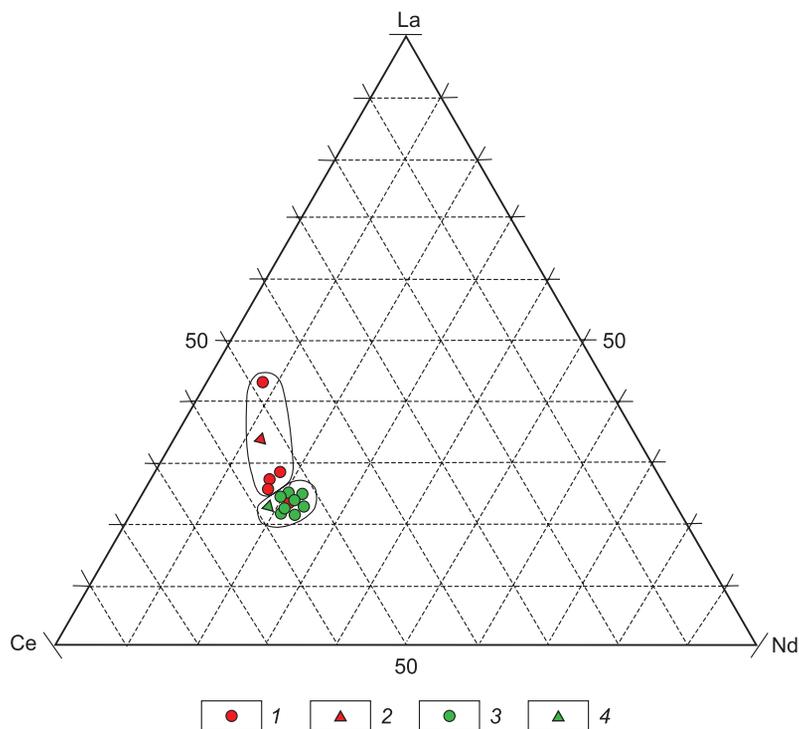


Рис. 9. Ce-La-Nd-диаграмма составов монацита из неопротерозойских пород хр. Енганэ-Пэ. Минералы из: 1, 2 – осадочных пород, 3, 4 – вулканогенно-осадочных пород; кружочек – неизмененный, треугольник – гидротермально измененный

Fig. 9. Ce-La-Nd diagram of monazite compositions from Neoproterozoic rocks of the Engane-Pe Range. Minerals from: 1, 2 – sedimentary rocks, 3, 4 – volcanic-sedimentary rocks; circle – unaltered, triangle – hydrothermally altered

каногенно-осадочных породах, образует разные отстоящие друг от друга поля по содержанию Y (рис. 10). Гидротермальный ксенотим-(Y) установлен только в вулканогенно-осадочных толщах, на диаграмме он характеризуется пониженным содержанием Y.

Синхизит-(Ce) чаще всего встречается как гидротермальный аксессуарный минерал в гранитах, щелочных сиенитах и карбонатитах. Синхизит обнаруживается на всем протяжении Урала. На Южном Урале этот минерал известен в виде включений в кварцитсодержащих прожилках кальцитов в Вишневогорском миаскитовом массиве [18] и метаморфитах Шатакского комплекса [19]. На Среднем Урале – в метасоматитах Сафьяновского медноколчеданного месторождения [20]. На Приполярном Урале минерал найден в кварц-серицитовых сланцах неопротерозойской пуйвинской свиты [21]. В метапелитах манюкяхинской свиты безводный фторкарбонат РЗЭ синхизит-(Ce), вероятно, образовался в результате замещения алланита в процессе гидротермально-метаморфических преобразований. Процесс замещения алланита фторкарбона-

тами РЗЭ (синхизитом в частности) описан в достаточном количестве публикаций [22–25]. В нашем случае он, вероятнее всего, реализуется на этой же стадии по реакции [23]: $REE^{2+} + Ca^{2+} + 2HCO_3^{-} = Ca(REE)(CO_3)_2F + 2H^{+}$.

Торит представлен мелкими скоплениями зерен (см. рис. 5, б). В его составе содержатся РЗЭ (до 4,42 мас.%), Р (до 4,77 мас.%), Y (до 8,88 мас.%), As (до 2,19 мас.%), содержание H₂O до 5,99 мас.%. Стехиометрическая формула торита (формула рассчитана на: Si + P + As + V = 1): $(Th_{0,44-0,55}Y_{0,21-0,24}Ca_{0,11-0,12}Zr_{0,08-0,09}Ce_{0,04}Fe_{0,03-0,04}Nd_{0,03}U_{0,05}Yb_{0,01-0,02}Gd_{0,01})_{\Sigma 1,05-1,11}(Si_{0,70-0,72}P_{0,19-0,20}As_{0,06}V_{0,03})_{\Sigma 1}O_4OH$ (см. табл. 1). Внутреннее строение однородное. Вероятно, этот минерал представляет собой твердый раствор ряда торит-гаспарит-монацит, по аналогии с установленным в 1962 г. церфосфорхаттонитом из амзонитового пегматита юго-восточной Сибири (промежуточный элемент серии твердых растворов монацита-(Ce) и хаттонита с соотношениями Th : LREE и Si : P, близкими к 1:1 [17]).

Кайнозит-(Y). Впервые типохимические особенности кайнозита-(Y) были изучены нами

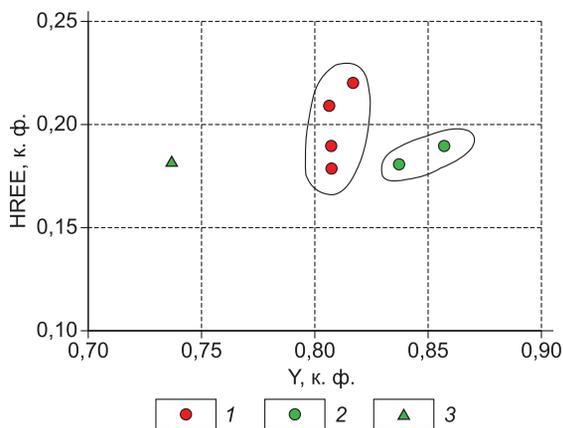
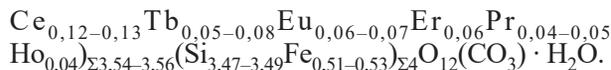


Рис. 10. Бинарная диаграмма (Y-HREE) ксенотима-(Y) из неопротерозойских пород хр. Енгане-Пэ. Усл. обозн. см. на рис. 8.

Fig. 10. Binary diagram (Y-HREE) of xenotime-(Y) from Neoproterozoic rocks of the Enganepe Range. Legend see to Fig. 8.

в метариолитах верхнерифей-вендской саблегорской свиты на Приполярном Урале – $(Y_{1,52}Ca_{0,88}Nd_{0,34}Gd_{0,20}Ce_{0,19}Sm_{0,18}Dy_{0,12}Pr_{0,06}La_{0,02})_{\Sigma 3,51}(Si_{3,59}Fe_{0,41})_{\Sigma 4}O_{12,49}(CO_3) \cdot H_2O$. На основании морфологии (в виде скоплений зерен, как и алланит-(Ce)) и химического состава кайнозита-(Y), а именно преобладание легких РЗЭ, нами был сделан вывод о том, что он образовался за счет перекристаллизации алланита-(Ce) при распаде эшинита-(Y) с участием гидротермальных растворов. Здесь в районе хр. Енганэ-Пэ Полярного Урала его формула имеет следующий вид: $(Y_{1,52-1,71}Ca_{0,44-0,46}Gd_{0,28-0,31}Nd_{0,26-0,29}Dy_{0,27}Sm_{0,17-0,19}$



Минерал – гидросиликат меди, свинца и железа, содержащий Nd, определенный нами как кризейит (?), установлен нами в вулканогенно-осадочных породах и определен как продукт вторичных изменений халькопирита, также он развивается и по кайнозиту-(Y) (см. рис. 6, а, б). Кризейит был обнаружен в андезитовой брекчии, сцементированной флюоритом в зоне окисления на месторождении Сент-Энтони, Аризона, США. Совместно с кризейитом в брекчии были установлены кварц, барит, хлорит, гематит, окисленные, иногда почти полностью, пирит, галенит, сфалерит и халькопирит [26]. Нанопористый кризейит также установлен на рудниках в карьере Сога на севере Чили [27], а также в Италии, Шотландии, Мексике и др., в России этот минерал еще не был описан. Известно, что кризейит полностью разрушается при температуре выше 550 °C [27]. Так как в нашем случае минерал не окислился полностью, вероятнее всего, температура его существования не превышала этот предел.

Учитывая, что этот минерал развивается и по халькопириту, и по кайнозиту-(Y), а также условия его образования, описанные выше, можно считать, что он формировался на самой поздней стадии формирования РЗЭ-минерализации в экзогенных условиях.

Проведенные исследования показали, что в осадочных и вулканогенно-осадочных углеродсодержащих породах присутствует, как минимум, две разновозрастных РЗЭ-содержащих минеральных ассоциации (рис. 11).

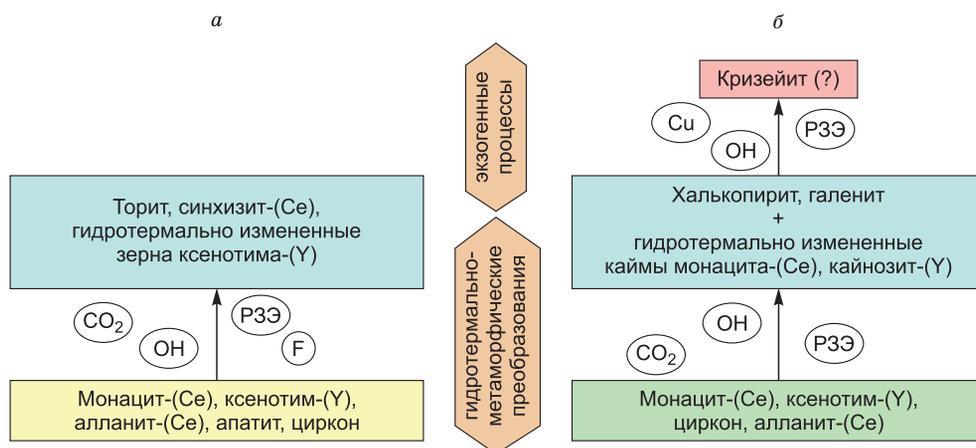


Рис. 11. Эволюция составов РЗЭ-содержащих минералов в породах хр. Енганэ-Пэ: а – осадочные, б – вулканогенно-осадочные образования. В овалах приведены элементы, которые содержали гидротермальные растворы

Fig. 11. Evolution of the compositions of REE-bearing minerals in the rocks of the Enganepe Ridge: а – sedimentary, б – volcanogenic-sedimentary formations. The elements contained in hydrothermal solutions are indicated in ovals

На начальном этапе происходили кристаллизация минералов из магматического расплава и переотложение их в осадочные и вулканогенно-осадочные породы, где основными концентраторами РЗЭ послужили монацит-(Ce), ксенотим-(Y) и алланит-(Ce). В дальнейшем при гидротермально-метаморфических преобразованиях формировались гидротермальные карбонаты – кайнозит-(Y) и синхизит-(Ce), а также гидротермально измененные зерна и каймы ксенотима-(Y), монацита-(Ce) и торита. В это же время или чуть позднее мог образовываться и минерал – гидросиликат меди, свинца и железа, содержащий неодим (определенный нами как кризейит (?), частично замещенный гидроокислами железа), образованный в результате замещения халькопирита.

О гидротермально-метаморфических преобразованиях РЗЭ-содержащих минералов из углеродсодержащих пород неопротерозойской манюкуяхинской свиты Полярного Урала свидетельствует и частое присутствие вкрапленности РЗЭ-минерализации по типу звездного неба (см. рис. 4, а, 5, в, з, 6, в, 7, а), когда РЗЭ высвобождаются из состава ранних минералов (поставщиков и концентраторов РЗЭ), часть из них группируется и образует собственные минеральные фазы, а другая часть остается все еще в неконцентрированном виде. Еще одним аргументом в пользу гидротермально-метаморфического происхождения исследуемых минералов свидетельствует их тяготение к прожилкам и трещинам в породах, а также присутствие гидротермального галенита в сульфидах.

Заключение

Изучена редкоземельная минерализация в разных петротипах углеродсодержащих пород хр. Енганэ-Пэ. Среди РЗЭ-содержащих минералов из отложений неопротерозойской манюкуяхинской свиты во всех исследуемых породах хр. Енганэ-Пэ на Полярном Урале обнаруживаются алланит-(Ce), монацит-(Ce) и ксенотим-(Y). В метапелитах хр. Енганэ-Пэ впервые установлен фторкарбонат РЗЭ – синхизит-(Ce) и редкая разновидность гидратированного торита с повышенными содержаниями REE, P, As – $(Th_{0,44-0,55}Y_{0,21-0,24}Ca_{0,11-0,12}Zr_{0,08-0,09}Ce_{0,04}Fe_{0,03-0,04}Nd_{0,03}U_{0,05}Yb_{0,01-0,02}Gd_{0,01})_{\Sigma 1,05-1,11}(Si_{0,70-0,72}P_{0,19-0,20}As_{0,06}V_{0,03})_{\Sigma 1}O_4OH$. В вулканогенно-осадочных породах хр. Енганэ-Пэ впервые установлен РЗЭ-водосодержащий силикат с карбоната-

ми – кайнозит-(Y), на поверхности халькопирита обнаружен водный силикат меди, свинца и железа, диагностированный нами как кризейит (?).

В качестве основных минералов-концентраторов РЗЭ и Th в осадочных и вулканогенно-осадочных углеродсодержащих породах манюкуяхинской свиты выступают циркон, апатит, алланит-(Ce), монацит-(Ce) и ксенотим-(Y). Синхизит-(Ce), торит, кайнозит-(Y), а также гидротермальные зерна и каймы ксенотима-(Y) и монацита-(Ce) образовались позднее, в результате замещения циркона и алланита под воздействием растворов, содержащих повышенные концентрации РЗЭ и P, в процессе гидротермально-метаморфических преобразований.

Список литературы / References

1. Матвеев А.И., Толстов А.В., Петров И.М. Схема создания редкометалльного кластера в Республике Саха (Якутия). *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(1):7–27. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-1-7-27>
Matveev A.I., Tolstov A.V., Petrov I.M. The proposal for developing a rare metal cluster in the Republic of Sakha (Yakutia). *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(1):7–27. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-1-7-27>.
2. Ковалев С.Г., Маслов А.В., Ковалев С.С. Минералого-геохимические аспекты поведения редкоземельных элементов при метаморфизме (на примере верхнедокембрийских структурно-вещественных комплексов Башкирского мегантиклинория, Южный Урал). *Георесурсы*. 2020;22(2):56–66. <https://doi.org/10.18599/grs.2020.2.56-66>
Kovalev S.G., Maslov A.V., Kovalev S.S. Mineralogical and geochemical aspects of rare earth-elements behavior during metamorphism (on the example of Upper Precambrian structural-material complexes of the Bashkir megaanticlinorium, Southern Urals). *Georesources*. 2020;22(2):56–66. (In Russ.) <https://doi.org/10.18599/grs.2020.2.56-66>.
3. Ковалев С.Г., Ковалев С.С., Шарипова А.А. Первые данные о редкоземельной минерализации в кислых разновидностях пород шатакского комплекса (Южный Урал). *Литосфера*. 2023;23(5):910–929. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-5-910-929>
Kovalev S.G., Kovalev S.S., Sharipova A.A. First data on rare earth mineralization in acid rock varieties of the Shatak complex (Southern Urals). *Lithosphere (Russia)*. 2023;23(5):910–929. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-5-910-929>.
4. Юдович Я.Э., Ефанова Л.И., Швецова И.В. и др. *Зона межформационного контакта в каре оз. Грубепендиты*. Сыктывкар: Геопринт; 1998. 97 с.

- Yudovich Ya.E., Efanova L.I., Shvetsova I.V. et al. *Zone of interformation contact in the lake's Grubependites crust*. Syktyvkar: Geoprint; 1998. 97 p. (In Russ.)
5. Козырева И.В., Швецова И.В., Попова Т.Н. Находка Nd-таленита на Приполярном Урале. *Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН*. 2004; 114(6):2–3.
- Kozyreva I.V., Shvetsova I.V., Popova T.N. Find of Nd-talenite in the Subpolar Urals. *Vestnik Instituta geologii Komi NTs UrO RAN*. 2004;114(6):2–3. (In Russ.)
6. Ковальчук Н.С. Редкоземельная минерализация в метаморфических сланцах пуйвинской свиты (RF₂), Приполярный Урал. *Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН*. 2015;250(10):38–44.
- Kovalchuk N.S. Rare-earth mineralization in metamorphic schists of the Puivinskaya suite (RF₂), Subpolar Urals. *Vestnik IG Komi SC UB RAS*. 2015;250(10):38–44. (In Russ.)
7. Удоргатина О.В., Капитанова В.А. Геохронология пород субстрата и руд редкометалльно-редкоземельных месторождений и рудопроявлений на севере Урала и Тимане. *Известия Коми НЦ УрО РАН*. 2016; 28(4):85–100.
- Udoratina O.V., Kapitanova V.A. Geochronology of the rocks of substrate and ores of rare metal – rare earth deposits and ore occurrences in the north of the Urals and Timan. *Proceedings of the Komi Science Centre Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2016; 28(4):85–100. (In Russ.)
8. Онищенко С.А., Кузнецов С.К. Палладий-золотосульфидная минерализация в андезитах на месторождении Чудное (Приполярный Урал). *Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН*. 2019;6:20–27. <https://doi.org/10.19110/2221-1381-2019-6-20-27>
- Onishchenko S.A., Kuznetsov S.K. Palladium-gold-sulfide mineralization in andesites at Chudnoye deposit (Subpolar Urals). *Vestnik IG Komi SC UB RAS*. 2019; 6:20–27. (In Russ.) <https://doi.org/10.19110/2221-1381-2019-6-20-27>
9. Гракова О.В., Попвасев К.С. Редкоземельные минералы в докембрийских породах северной части Ляпинского антиклинория (Приполярный Урал). *Литосфера*. 2024;24(4):661–674. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-4-661-674>
- Grakova O.V., Popvasev K.S. Rare-earth minerals in pre-Cambrian rocks of the Lyapinskii anticlinorium (Subpolar Urals). *Lithosphere (Russia)*. 2024;24(4):661–674. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-4-661-674>
10. Гракова О.В., Уляшева Н.С. Металлогенические особенности верхнепротерозойских углеродсодержащих сланцев няровейской серии (Полярный Урал). *Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН*. 2016;9-10:16–21. <https://doi.org/10.19110/2221-1381-2016-10-16-21>
- Grakova O.V., Ulyasheva N. S. Metallogeny of features of carbonaceous shales of the Nyarovei series (Polar Urals). *Vestnik IG Komi SC UB RAS*. 2016;9-10:16–21. (In Russ.) <https://doi.org/10.19110/2221-1381-2016-10-16-21>
11. Гракова О.В., Попвасев К.С., Уляшева Н.С. Типохимизм и возможные источники исходных компонентов Се–Cu–Ni-содержащего ферросапонита из метабазитов севера Урала. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2024;29(3):372–383. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-3-372-383>
- Grakova O.V., Popvasev K.S., Ulyasheva N.S. Typochemistry and possible sources of ferrosaponite with Се–Cu–Ni from the metabasalts of the Northern Ural. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2024;29(3):372–383. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-3-372-383>
12. Вовчина Т.А., Шуйский А.С. Редкоземельная минерализация в риолитах Лядгейского комплекса хребта Енганепэ, Полярный Урал. В кн.: *Структура, вещество, история литосферы Тимано-Североуральского сегмента: Материалы 32-й научной конференции, г. Сыктывкар, 21–22 ноября 2023 г.* Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН. С. 16–19.
- Vovchina T.A., Shuysky A.S. Rare earth mineralization in rhyolites of the Lyadgei complex of the Enganepe ridge, Polar Urals. In: *Structure, substance, history of the lithosphere of the Timan-Severouralsk segment: Proceedings of the 32nd scientific conference, Syktyvkar, November 21–22, 2023*. Syktyvkar: IG Komi Scientific Center Ural Branch RAS, pp. 16-19. (In Russ.)
13. Булах А.Г., Золотарев А.А., Кривовичев В.Г. *Структура, изоморфизм, формулы, классификация минералов*. СПб.: Изд-во СПбГУ; 2014. 133 с.
- Bulakh A.G., Zolotarev A.A., Krivovichev V.G. *Structure, isomorphism, formulas, classification of minerals*. St. Petersburg: St. Petersburg State University Publishing House; 2014. 133 p. (In Russ.)
14. Кривовичев В.Г., Гульбин Ю.Л. Рекомендации по расчету и представлению формул минералов по данным химических анализов. *Записки Российской минералогического общества*. 2022;151(1):114–124. <https://doi.org/10.31857/S0869605522010087>
- Krivovichev V.G., Gulbin Yu.L. Recommendations for the calculation and presentation of mineral formulas based on chemical analysis data. *Proceedings of the Russian Mineralogical Society*. 2022;151(1):114–124. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0869605522010087>
15. *Государственная геологическая карта РФ масштаба 1:200 000*. Издание второе. Серия Полярно-Уральская. Лист Q-41-XI (Елецкий). Объяснительная записка. Ред. М. А. Шишкин. М.: МФ ВСЕГЕИ; 2013. 217 с.
- State Geological Map of the Russian Federation, scale 1:200,000. Second edition. Polar-Ural Series. Sheet Q-41-XI (Eletsky). Explanatory note. Ed. M. A. Shishkin. Moscow: MF VSEGEI; 2013. 217 p. (In Russ.)
16. Гинзбург А.И., Журавлева Л.Н., Иванов И.Б. и др. *Геология месторождений редких элементов. Выпуск 3. Редкоземельные элементы и их место-*

рождения. М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по геологии и охране недр; 1959. 126 с.

Ginzburg A.I., Zhuravleva L.N., Ivanov I.B., et al. *Geology of rare element deposits. Issue 3. Rare earth elements and their deposits*. Moscow: State Scientific and Technical Publishing House of Literature on Geology and Subsoil Conservation; 1959. 126 p. (In Russ.)

17. Mineral database Mindat.org Access mode: <https://www.mindat.org/min-35958.html> (accessed: 24.02.2025)

18. Попова В.И., Попов В.А., Макагонов Е.П. и др. *Вишневые Горы. Том 25, Выпуск 3*. М.: Минералогический Альманах; 2021. 128 с.

Popova V.I., Popov V.A., Makagonov E.P., et al. *Vishnevyye Gory. Volume 25, Issue 3*. Moscow: Mineralogical Almanac; 2021. 128 p. (In Russ.)

19. Ковалев С.Г., Ковалев А.А., Шарипова А.А. Редкоземельная минерализация в терригенных отложениях Шатакского комплекса (Южный Урал): видовое разнообразие и особенности химического состава. *Литология и полезные ископаемые*. 2024;1:19–33. <https://doi.org/10.31857/S0024497X24010027>

Kovalev S.G., Kovalev A.A., Sharipova A.A. Rare-earth mineralization in terrigenous deposits of the Shatak complex (Southern Urals): species diversity and features of chemical composition. *Litologiya i poleznyye iskopayemye*. 2024;1:19–33. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0024497X24010027>

20. Сорока Е.И., Притчин М.Е., Леонова Л.В., Булатов В.А. Редкоземельные фторкарбонаты в породах Сафьяновского медно-цинково-колчеданного месторождения (Средний Урал). *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*. 2023;508(1):50–57. <https://doi.org/10.31857/S2686739722600552>

Soroka E.I., Pritchinn M.E., Leonova L.V., Bulatov V.A. Rare earth fluorocarbonates in rocks of the Safyanovsky copper-zinc-pyrite deposit (Middle Urals). *Doklady*

Rossiyskoy akademii nauk. Nauki o Zemle. 2023; 508(1):50–57. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S2686739722600552>.

21. Юхтанов П.П., Бурлаков Е.В. Анкилит и синхизит из хрусталеносных гнезд Приполярного Урала. *Труды Института геологии, Коми филиал АН СССР*. 1985;50(14):99–104.

Yukhtanov P.P., Burlakov E.V. Ankyllitis and synchisitis from crystal-bearing nests of the Subpolar Urals. *Trudy Instituta geol., Komi filial AN SSSR*. 1985; 50(14):99–104. (In Russ.)

22. Littlejohn A.L. Alteration products of accessory allanite in radioactive granites from the Canadian shield. *Geological Survey of Canada*. 1981;81:95–104.

23. Lira R., Ripley E. Fluid inclusion studies of the Rodeo de Los Molles REE and Th deposit, Las Chacras Batholith, Central Argentina. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1990;54(3):663–671. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(90\)90362-O](https://doi.org/10.1016/0016-7037(90)90362-O)

24. Gieré R., Sorenses S.S. Allanite and ther REE-Rich Epidote-Group Minerals. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 2004;56(1):431–493. <https://doi.org/10.2138/gsrng.56.1.431>

25. Alles J., Ploch A.-M., Schirmer T., Nolte N., et al. Rare-earth-element enrichment in post-Variscan polymetallic vein systems of the Harz Mountains, Germany. *Mineralium Deposita*. 2019;54(2):307–328. <https://doi.org/10.1007/s00126-018-0847-8>

26. Williams S.A., Bideaux R.A. Creaseyite, $Cu_2Pb_2(Fe,Al)_2Si_5O_{17} \cdot 6H_2O$ a new mineral from Arizona and Sonora. *Mineralogical Magazine*. 1975;40(311):227–231. <https://doi.org/10.1180/minmag.1975.040.311.02>

27. Malcherek T., Köslin B., Schlüter J. The crystal structure of creaseyite: a disordered, nanoporous lead iron copper alumosilicate. *Zeitschrift für Kristallographie - Crystalline Materials*. 2013;228(3):134–139. <https://doi.org/10.1524/zkri.2013.1572>

Об авторах

ГРАКОВА Оксана Васильевна, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-5917-9218>, ResearcherID: K-8365-2018, Scopus Author ID: 57192210915, SPIN: 9767-2911, e-mail: ovgrakova@geo.komisc.ru

ПОПВАСЕВ Константин Степанович, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-2005-5901>, ResearcherID: HKV-8452-2023, Scopus Author ID: 58064830100, SPIN: 5466-4404, e-mail: kspopvasev@geo.komisc.ru

Вклад авторов

Гракова О.В. – разработка концепции, руководство исследованием, проведение исследования, верификация данных, создание черновика рукописи; редактирование рукописи; **Попвасев К.С.** – проведение исследования; верификация данных, создание черновика рукописи; редактирование рукописи

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

GRAKOVA, Oksana Vasil'evna, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-5917-9218>, ResearcherID: K-8365-2018, Scopus Author ID: 57192210915, SPIN: 9767-2911, e-mail: ovgrakova@geo.komisc.ru

О. В. Гракова, К. С. Попвасев ♦ Условия формирования РЗЭ-содержащих минералов...

POPVASEV, Konstantin Stepanovich, Junior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-2005-5901>, ResearcherID: HKV-8452-2023, Scopus Author ID: 58064830100, SPIN: 5466-4404, e-mail: kspopvasev@geo.komisc.ru

Authors' contribution

Grakova O.V. – conceptualization, supervision, investigation, validation, writing – original draft, writing – review & editing; **Popvasev K.S.** – investigation, validation, writing – original draft, writing – review & editing

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 14.04.2025

Поступила после рецензирования / Revised 14.05.2025

Принята к публикации / Accepted 21.05.2025